

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.014

无刷直流电机双模糊直接转矩控制系统的研究

张建伟¹, 孙伟卿¹, 金建中²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海电动工具研究所, 上海 201604)

摘要:针对无刷直流电机直接转矩控制存在传统PID速度环自适应较差和相对较大的转矩脉动等问题,对直接转矩控制系统的转矩观测等方面进行了研究,对直接转矩控制策略进行了归纳,提出了一种双模糊控制策略。在转速闭环中,以模糊自适应PID代替普通的PID控制,实现了PID参数的自适应整定。在转矩控制环中,在转矩滞环控制器的基础上,将转矩的偏差和转矩偏差的变化率模糊化,模糊控制非零矢量和零矢量的作用时间,消除了容差宽度选择对转矩脉动的影响,使转矩脉动进一步减小。研究结果表明,相比普通的直接转矩控制系统,引入双模糊控制策略的直接转矩控制系统,可进一步地减小电磁转矩脉动和提高转速的自适应调节能力,显著地改善系统的控制性能。

关键词:无刷直流电机;直接转矩控制;模糊自适应;模糊控制

中图分类号:TH39;TM301.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0763-05

Double fuzzy direct torque control system of BLDCM

ZHANG Jian-wei¹, SUN Wei-qing¹, JIN Jian-zhong²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Electric Tool Institute, Shanghai 201604, China)

Abstract: Aiming at issue that the direct torque control of brushless DC motor had large torque ripple and poor self-adaptability of traditional PID speed loop, the speed loop and torque controller of the direct torque control system were studied, and the direct torque control strategy was summarized, and a double fuzzy control strategy was proposed. In the speed loop, the basic PID controller was replaced by the fuzzy adaptive PID controller, and self-tuning of the PID parameters was implemented. In the torque control loop, on the basis of the torque hysteresis controller, the torque deviation and the rate of change of the torque deviation were fuzzified, the action time of the non-zero vector and the zero vector was controlled by fuzzy control, and eliminates the hysteresis width selection torque ripple effect, so that further reduce the torque ripple. The results indicate that compares with the traditional direct torque control system of brushless DC motor, the direct torque control system with double fuzzy control strategy can further improve the self-adaptability of rotation speed and the anti-disturbance ability of load torque, which greatly improves the control performance of the system.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); direct torque control; fuzzy self-adaptive PID; fuzzy control

0 引言

无刷直流电机拥有像直流电机一样的调速性能,同时也具有感应电机的结构简单、能量密度大、可靠性高等优点。

但由于其齿槽转矩波动和换相转矩的波动,影响

了整个系统的性能,限制了其在更高精度系统中的应用^[1-2]。

针对这一问题,国内外学者将直接转矩控制引入到无刷直流电机控制系统,并进行了多方面的改进研究。LIU Yong 等人^[3]提出了BLDCM的DTC控制方案,采用定子磁链幅值和电磁转矩双闭环的控制策略。

收稿日期:2016-11-29

作者简介:张建伟(1991-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事电机驱动控制方面的研究。E-mail:379909040@qq.com

该方案保持了无刷直流电机传统两两导通模式下的良好的转矩特性,系统具有良好的稳定性,但系统依然存在磁链估算和给定复杂等问题。文献[4]利用端电压和中性点电压测量,观测其电磁转矩。该方法省略掉了磁链观测与定子恒磁通观测部分,使控制系统的结构大大简化。系统具有较高的控制精度,但转矩估算计算量大,会影响系统的实时性。文献[5]提出一种磁链自控的 DTC 方案,通过滑模观测器观测电机反电动势,从而估算出转矩,但系统依然存在滞环宽度选择问题,进而影响到转矩脉动。文献[6-7]模糊控制策略应用到无刷直流电机 DTC 控制系统,将定子磁链幅值误差、电角度和转矩误差作为模糊控制器的输入,空间电压矢量作为输出。该方法模糊控制的加入使控制系统具有更好的鲁棒性,但系统有磁链观测等,使系统较为复杂,且转速环采用 PI 控制,当系统受干扰、参数发生变化时,不能实时的整定 PID 参数,会影响到转矩值得给定,因而进一步影响系统的整体性能。

因此,为了进一步提高转速、转矩的控制性能,本研究在现有研究的基础上,从系统的整体性能出发,提出双模糊控制策略,以自适应模糊 PID 为转速控制器和普通模糊控制为转矩控制器,通过反电动势形状函数来实时观测转矩的值,从而实现对电磁转矩实时精确控制。

1 无刷直流电机 DTC 控制系统

1.1 直接转矩控制原理

由电机原理可知,电机的电磁转矩可表示为:

$$T_e = \frac{3P}{2L_s} |\psi_s| |\psi_f| \sin\delta \quad (1)$$

式中: P —电机极对数, $|\psi|$ —定子磁链的幅值, $|\psi_f|$ —转子磁链的幅值, δ —磁通角。

对于无刷直流电机来说,转子是由永磁铁构成,由此可认为转子的磁链大小不变。在控制电机的转矩中,由于相对机电时间常数,电磁时间常数是很大的,在改变定子磁链时,可认为转子的旋转速度不变。因此磁通角的改变,可以通过控制定子的磁链。进而改变电磁转矩。

系统采用转矩闭环两点式控制器,转矩控制器如图 1 所示。

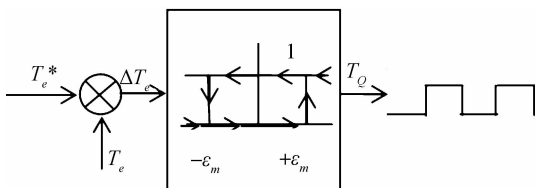


图 1 转矩两点式控制器

控制器的输入量是转矩目标值 T_e^* 和转矩反馈量 T_e 的偏差 ΔT_e ,容差是 $\pm \varepsilon_m$,输出是 T_Q ,采用离散的两点式控制方式。当 $\Delta T_e \geq +\varepsilon_m$ 时, T_Q 输出为“1”,在其作用下根据转子的位置,使电机接通非零的电压矢量,使电磁转矩 T_e 增加;当 $\Delta T_e \leq -\varepsilon_m$ 时, T_Q 输出为“0”,在其作用下电机接通零的电压矢量,使平均电磁转矩 T_e 减少;由上分析可知,只要合理的选择容差 ε_m 值,转矩控制器就能将转矩脉动控制在容差范围内,达到抑制电机转矩脉动的目的。

在传统的滞环转矩控制的基础上,引入模糊控制策略,将转矩误差和转矩误差的变化率作为模糊控制的输入,输出为非零矢量和零矢量作用的时间,消除了滞环宽度对转矩脉动的影响。

1.2 双模糊 DTC 控制系统框图

双模糊 DTC 控制系统框图如图 2 所示。

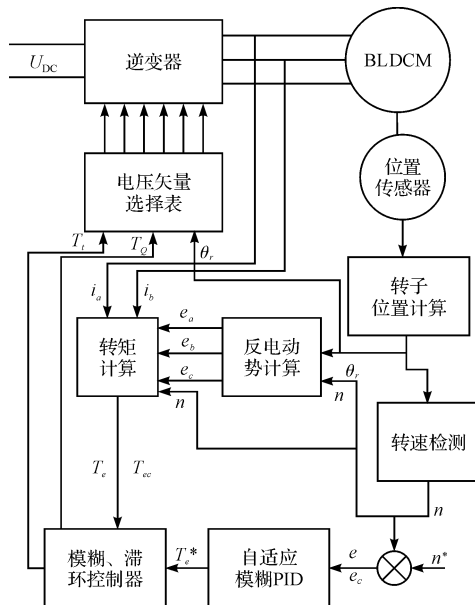


图 2 双模糊 DTC 控制系统框图

无刷直流电机 DTC 系统控制策略分为两种类型:磁链自控 DTC 和恒磁链轨迹 DTC^[8]。本研究采用磁链自控 DTC,转矩采用普通模糊控制,转速环为模糊自适应 PID,框图中没有磁链观测环节,仅由一个转矩内环和转速外环构成。将计算得到的电动机电磁转矩和给定转矩值比较,经过滞环、模糊控制,得到电压空间矢量作用时间 T_i 的值,结合转子磁链位置 θ_r 就可以得出相应的空间电压矢量作用于电动机,从而对电磁转矩进行控制。

1.3 电磁转矩观测

常用的电磁转矩观测方式有两个公式。一种是不含反电动势的,如下式所示:

$$T_e = \frac{2}{3}P\left(\frac{d\psi_{r\alpha}}{d\theta_r}i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{r\beta}}{d\theta_r}i_{s\beta}\right) \tag{2}$$

式中: P —电机的极对数; $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ —定子电流转子磁链、在两相静止交流坐标系(α - β)上的分量; θ_r —转子的位置角度。

第二种方法是利用BLDCM常用的转矩方程式,如下式所示:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \tag{3}$$

式中: T_e —电机转矩, ω_r —电机机械角速度。

第一种方法中定子磁链计算过程较为复杂,本研究采取第二种方法对转矩进行观测。

本研究采用式(3)对电磁转矩进行实时观测,其重要在于对反电动势的值精确估算。本研究采用基于反电动势形状函数来实现无刷直流电机DTC控制^[9-10]。控制系统开关管采用两两导通的形式,那么三相反电动势电角度相差120°。

以 a 相反电动势为例,梯形波的幅值为1,反电动势形状函数图如图3所示。

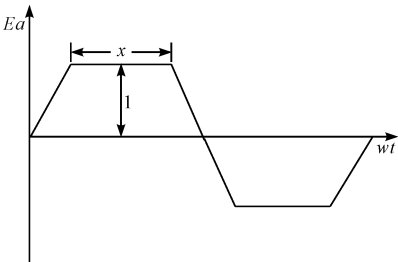


图3 反电动势形状函数

注: E_a —标么化处理后的形状函数; x —梯形波平顶部分的宽度(可通过实验求得)

图3中, E_a 和实际的反电动势还差一个倍数。对于实际某一电动机,这个倍数是一个常数。只要知道瞬时电动机的位置角度和转速 n ,在通过反电动势形状函数就可以求得反电动势的瞬时值 E_a, E_b, E_c 。而实际三相电流值也可以实时的检测到,从而实现对电磁转矩的实时观测。

1.4 电压空间矢量

在无刷直流电机DTC系统中,电压空间矢量是极其重要的关键物理量,因为它是DTC系统的原始推动力。空间矢量采用6个数字表示法^[2]。每个数字对应一个管子,1代表管子导通,0代表管子关断。因此,逆变器的6个有效状态 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 依次是(100001)、(001001)、(011000)、(010010)、(000110)、(100100)。并把(000000)定义为零矢量 V_0 ,具有降低转矩的功能。各个管子开关状态 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 和电压空间矢量

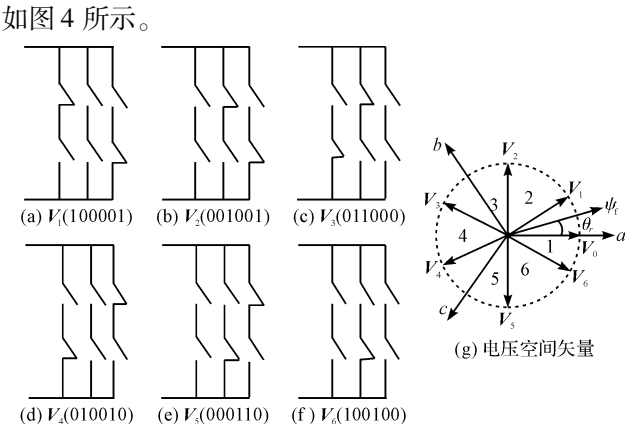


图4 不同开关状态和电压空间电压矢量

a, b, c —定子三相坐标系; Ψ_f —转子磁链矢量; θ_r —转子的位置角度;空间电压矢量把平面分成6个扇区为1、2、3、4、5、6。

随着转子的转动,转子磁链矢量也在改变,因此所施加的电压空间也要改变,电压空间矢量的选择是以使转矩变化最快的原则选取。由此,通过转子的角度位置和转矩控制器的输出可得出最优的空间矢量选择^[11-12],如表1所示。

表1 空间电压矢量选择表

T_Q	θ_r					
	1	2	3	4	5	6
1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0

2 双模糊控制器的设计

2.1 模糊自适应PID转速控制器

转速环用模糊自适应PID,模糊控制优化PID参数。由于控制器微分容易受到干扰影响,不采用微分控制,所以控制器是一个二输入二输出的结构,输入变量是转速误差 e 和转速误差的变化率 e_c 。输出量是PI参数调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 。设计的输入输出模糊论域为负大NB、负中NM、负小NS、零ZO、正小PS、正中PM、正大PB。模糊输入输出的论域值为 $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ 。通过PI控制经验,推理出 ΔK_p 模糊控制规则表,如表2所示。

表2 ΔK_p 模糊规则控制表

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

根据表 2,可易知 ΔK_i 规则和 49 条模糊控制条件语句,语句形式为:If e is “NB” and e_c is “NB” then ΔK_p is “PB” and ΔK_i is “NB”。通过控制器实时调整参数 ΔK_p 、 ΔK_i ,进而获得理想的 PI 控制器参数。

2.2 模糊转矩控制器

由于转矩滞环控制器两点式控制的特点,无论转矩偏差的大小,空间电压矢量都要作用整个控制周期,结果难免会使转矩脉动较大。

转矩控制器在原滞环控制的基础上,在加入普通的二输入一输出的模糊控制器。以转矩偏差 T_e 、转矩偏差的变化率 T_{ec} 为输入,空间电压矢量作用时间 T_i 为输出。在采用周期里,当 T_e 大于零时,先用非零电压空间矢量使电磁转矩上升,然后用零矢量使电磁转矩下降;当 T_e 小于零时,先用零电压空间矢量使电磁转矩下降,然后用非零矢量使电磁转矩上升;这样转矩在一上一下或者一下一上,根据模糊控制器输出矢量作用时间,使转矩控制在相对较小的容差范围内。

设计输入 T_e 、 T_{ec} 的模糊论域为负大 NB、负小 NS、零 ZO、正小 PS、正大 PB,其论域值为 $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$ 。电压空间矢量作用时间的模糊论域为零 ZO、小 PS、中 PM、较大 PR、大 PB,论域值为 $\{0, 5, 10, 15, 20\}$,这里设置采用周期设置为 10 μ s,那么输出控制器的比例因子为 0.5。其模糊控制规则表如表 3 所示。

表 3 空间电压矢量作用时间规则表

T_e	T_{ec}				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PR	PM	PM	PS
NS	PR	PM	PS	PS	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	PS	PS	PM	PR
PB	PS	PM	PR	PB	PB

3 实验及结果分析

本研究在 SIMULINK、FUZZY 模块对传统 DTC 系统和双模糊 DTC 仿真对比。电机参数为:电阻 R 为 4.765 Ω ,电感 L 为 8.5 mH,额定电压 U_N 为 300 V,额定转速 n 为 2 000 r/min,极对数 P 为 2,额定转矩 T_N 为 1.5 N·m。转速控制器的参数初始值 $k_i = 0.007$, $k_p = 5$;转矩滞环的宽度设置为 $\varepsilon_m = 0.005$ N·m。

转速 $n = 2\,000$ r/min,负载转矩为 1.5 N·m,普通 DTC 控制系统和双模糊 DTC 的转速仿真波形如图 5 所示。

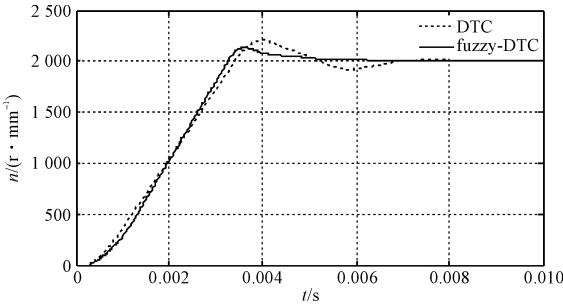


图 5 DTC 控制系统和双模糊 DTC 的转速响应

转速 $n = 2\,000$ r/min,负载转矩为 1.5 N·m,普通 DTC 控制系统和双模糊 DTC 的转矩仿真波形如图 6、图 7 所示。

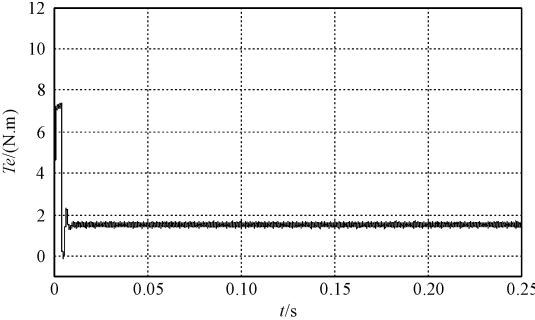


图 6 DTC 转矩稳态响应

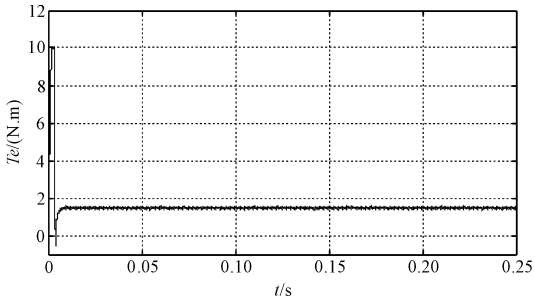


图 7 双模糊 DTC 转矩稳态响应

由图 5 可以看出,双模糊 DTC 系统转速的上升时间和超调更少,且响应达到目标值的时间更短。由图 6 和图 7 对比易知,相对 DTC 系统,双模糊控的 DTC 系统,转矩的响应速度和转矩脉动更小。

转速 $n = 2\,000$ r/min,0.05 s 负载转矩由 1.5 N·m 变为 0.75 N·m,普通 DTC 控制系统的转矩仿真波形如图 8 所示。

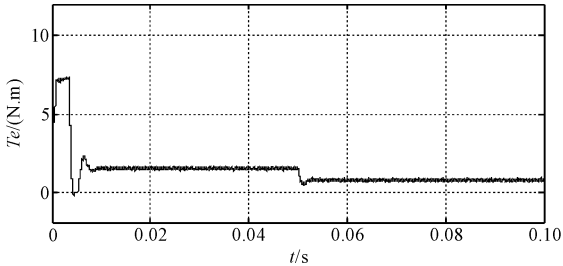


图 8 DTC 控制系统转矩动态响应

转速 $n = 2\,000\text{ r/min}$, 0.05 s 负载转矩由 $1.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 变为 $0.75\text{ N}\cdot\text{m}$, 双模糊 DTC 的转矩仿真波形如图 9 所示。

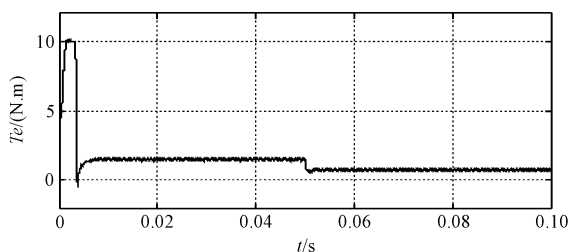


图9 双模糊 DT 系统转矩动态响应

由图 8 和图 9 可看出 DTC 系统转矩稳态响应和在 0.25 s 时候转矩的动态响有一些振荡, 双模糊 DTC 响应速度更快、更稳定。

由上分析可知, 相对传统无刷直流电机 DTC 系统, 双模糊控制的无刷直流电机 DTC 系统, 转速超调小, 响应快、跟随性更好。转矩脉动相对减小, 控制精度更高。

4 结束语

本研究在分析了无刷直流电机的直接转矩控制原理的基础上, 从系统的整体性能出发, 总结了无刷直流电机转矩的观测方法, 应用反电动势形状函数估算转矩的值, 使系统具有较好的精确度和实时性。同时提出了一种双模糊控制的无刷直流电机 DTC 控制系统, 根据转矩误差和转矩误差的变化率, 模糊控制非零、零电压矢量的作用时间, 使其代替传统的转矩滞环控制器, 转速环采用模糊自适应 PID。

仿真结果表明, 双模糊控制的无刷直流电机 DTC 控制系统具有良好的转速、转矩特性, 转矩脉动小, 转速跟随性好, 系统具有较好自适应性, 对现今无刷直流电机控制系统具有较好的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 潘晓磊, 赵川, 吕海立. 无刷直流电机模糊自适应 PID 控制的研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(3): 85-89.
- [3] LIU Y, ZHU Z Q, HOWE D. Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple[J]. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2005, 41(2): 599-608.
- [4] 夏长量, 张茂华, 王迎发, 等. 永磁无刷直流电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 104-109.
- [5] 安群涛, 孙立志, 刘超, 等. 无刷直流电机的磁链自控直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 86-92.
- [6] 王晓远, 田亮, 冯华, 等. 无刷直流电机直接转矩模糊控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 28(15): 134-138.
- [7] 王占友, 谢顺依. 改进 BLDC 转矩性能的模糊控制器的设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 913-918.
- [8] 周扬忠, 胡育文. 交流电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 余祥云. 无位置传感器无刷直流电机的直接转矩控制[D]. 湖南: 湖南大学机械与运载工程学院, 2013.
- [10] ZHANG L, QU W L, LU H F, et al. Torque direct control method for BLDC motors with non-ideal back EMF waveforms[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(10): 1570-1573.
- [11] 胡育文, 高瑾, 杨建飞, 等. 永磁同步电机直接转矩控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [12] 于慎波, 段维, 钟双双. 永磁同步主轴电磁振动研究[J]. 机械, 2015, 43(4): 5-8.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

张建伟, 孙伟卿, 金建中. 无刷直流电机双模糊直接转矩控制系统的研究[J]. 机电工程, 2017, 34(7): 763-767.

ZHANG Jian-wei, SUN Wei-qing, JIN Jian-zhong. Double fuzzy direct torque control system of BLDCM[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(7): 763-767.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>